

И.Г.Товаровский, В.И.Большаков, А.Е.Меркулов

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И РЕЖИМОВ
ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ
ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ШИХТЫ**

С помощью разработанной в Институте многозонной математической модели доменной плавки выполнено аналитическое исследование показателей и процессов плавки при изменении общего содержания железа в шихте, степени его металлизации и степени офлюсования пустой породы с варьированием распределения материалов по радиусу печи. Выявлены внутренние связи процессов в объеме доменной печи, влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты, для условий доменных печей объемом более 5000 м³. Полученные новые научные результаты могут быть использованы для практического применения

доменная печь, математическая модель, распределение температур, железо, известняк.

Задачей настоящей работы является оценка влияния общего содержания железа в шихте, степени его металлизации и степени офлюсования пустой породы на показатели плавки с позиций системного подхода. Известные оценки на основе эмпирических данных и балансовых расчетов [1, 2] дают, главным образом, связи исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность) с использованием лишь отдельных промежуточных параметров без раскрытия всей полноты внутренних связей, влияющих на характер режимов плавки и конечные результаты.

Для системной оценки влияния содержания железа в шихте на показатели плавки в настоящей работе используется разработанная в ИЧМ НАН Украины математическая модель [3], отличающаяся тем, что на основе структурной увязки многозонных по высоте и радиусу доменной печи и общих балансов масс и теплоты увеличены прогнозные возможности модели, в том числе по установлению новых количественных связей процессов и выявлению влияния неравномерности распределения материалов по радиусу печи на показатели плавки.

Особенности модели и методики исследования. Протекание процессов теплопередачи и восстановления железа в кольцевых зонах по высоте столба шихты описывается в модели дискретно системой материально-тепловых балансов в 12 зонах по вертикали с интервалами температур шихты от начальной до 400⁰С и далее через каждые 100⁰С вплоть до температуры продуктов плавки. Каждая из вертикальных зон характерна своей спецификой протекания процессов тепло- и массопередачи, а также перехода материалов от твердой фазы к жидкой через тестообразное состояние. В периферийной кольцевой зоне по всей высоте столба шихты учитывается потеря теплоты через стенки печи. Равновеликим по горизон-

тальной площади колошника кольцевым зонам соответствуют 10 угловых положений лотка бесконусного загрузочного устройства. Загрузка этих зон отличается друг от друга соотношением компонентов шихты (в первую очередь кокса и железорудной части), задаваемым программой загрузки и вычисляемым в модели загрузки, где предусматривается задание распределения на колошнике каждого отдельного компонента железорудных материалов и кокса. Это обуславливает разный состав шихты и соответственно различный состав формируемых шлаков в разных радиальных зонах (РКЗ). В соответствии с этим, температурные границы начала размягчения, плавления и полного ожигения определяются для каждой РКЗ. Зависимость температур начала размягчения, плавления и полного ожигения от химического состава шихты определяли для каждой РКЗ и рассчитывали по разработанной в ИЧМ обобщенной модели, являющейся одним из модулей общей многозонной модели доменной плавки, основанной на прогнозировании этих температур при помощи интегральных критериев «свертки» химического состава с учетом межатомного взаимодействия компонентов шлаковой связки с последующей корректировкой указанных температур по степени восстановления материалов и количеству вносимых и циркулирующих в печи щелочных оксидов (K_2O+Na_2O). Таким образом, весь объем столба шихты разбит на $10 \times 12 = 120$ условных ячеек, для каждой из которых выполняется расчет зонального материально-теплого баланса, увязанного с общим материально-тепловым балансом печи.

Новый подход открыл дополнительные возможности анализа процессов и разработки мер по повышению эффективности плавки, включающие: выявление лимитирующей зоны по высоте и поперечному сечению печи; количественный учет повышенной тепловой нагрузки на газовый поток в периферийной зоне (за счет теплотерь); учет перетоков газа на разных горизонтах из одних радиальных кольцевых зон (РКЗ) в другие; оценку развития восстановительного процесса, в частности степени прямого восстановления, в кольцевых сечениях по радиусу печи; установление влияния распределения материалов по радиусу печи на теплотери, а также влияния всех технологических факторов на расход кокса с учетом изменения теплотерь; оценку роли зоны размягчения и плавления (с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов) в формировании режимов плавки и соответствующих температурно – концентрационных полей печи.

Для оценки влияния содержания железа в шихте на показатели процессов доменной плавки использовали данные о работе доменных печей №9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (ОАО «АМКР») полезным объемом 5000 м^3 и №5 ОАО «Северсталь» полезным объемом 5500 м^3 в характерные периоды их работы, принятые в качестве базовых. Невязки баланса газифицированных элементов в базовых периодах минимизировали путем корректировки состава колошникового газа на ДП-9 и содержания

кислорода в дутье на ДП-5 – параметров, наиболее вероятно вносящих по результатам анализа, наибольшие погрешности. Далее, задавая различное содержание железа в компонентах шихты (с соответствующей корректировкой остальных компонентов), выполнили расчетные прогнозы показателей процессов плавки для двух вариантов распределения относительных рудных нагрузок ($PH_{отн}$) на колошнике (рис.1).

Влияние общего содержания железа в шихте. Поскольку содержание железа в шихте зависит от основности, следует оперировать обобщенным показателем – содержанием железа в условно-самоплавкой шихте. Оно определяется как количество железа во всех компонентах (в том числе известняки, металлодобавки, шлаковые добавки и т.д.), кроме кокса, деленное на общий расход этих компонентов без CO_2 карбонатов. Таким образом, расход сырого флюса входит в сумму компонентов шихты за вычетом содержащегося в нем CO_2 . Указанный показатель содержания железа позволит сравнить богатство шихт с разной основностью и исключить имеющую место неоднозначность существующего показателя содержания железа в шихте. Содержание железа в условно-самоплавкой шихте однозначно связано с выходом шлака на 1 т чугуна. Поэтому в ходе анализа можно оперировать только одной из указанных величин.

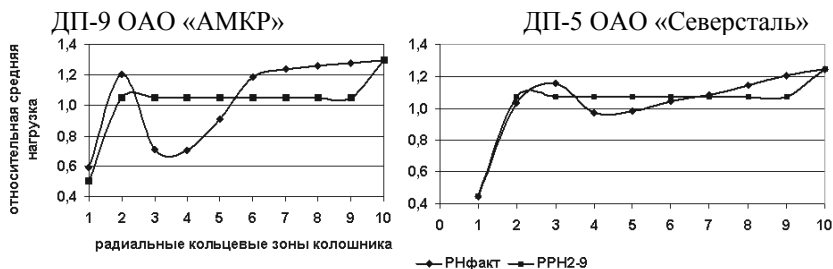


Рис.1. Распределение относительных рудных нагрузок ($PH_{отн}$) по РКЗ колошника ДП-9 и ДП-5 при фактических условиях ($PH_{факт}$) и при переходе к равномерному распределению в РКЗ 2-9 ($PPH_{2.9}$)

Повышению содержания железа на каждый 1% при одинаковой окисленности соответствует уменьшение количества шлака на величину, которая может быть определена следующим образом. Из 1 кг сырьевых материалов, включая известняки без CO_2 , при среднем содержании железа %Fe образуется чугуна $\%Fe/Fe_c$ и шлака $1 - 0,01 \cdot \%Fe \cdot O_{Fe}$, где: Fe_c – содержание железа в чугуне, %; O_{Fe} – масса оксидов железа, кг/кгFe. Количество шлака на единицу чугуна составляет:

$$Ш = (1 - 0,01 \cdot \%Fe \cdot O_{Fe}) / (\%Fe/Fe_c) = Fe_c / \%Fe - 0,01 \cdot Fe_c \cdot O_{Fe}, \text{ кг/кг.}$$

Для оценки изменения количества шлака при изменении содержания железа возьмем частную производную от количества шлака Ш по содер-

жанию железа $\%Fe$: $\partial Ш / \partial \%Fe = Fe_4 / (\%Fe)^2$, кг шлака на 1кг чугуна на каждый 1% железа в шихте. Перейдя к размерности кг/т чугуна, получим:

$\partial Ш / \partial \%Fe = 10^3 \cdot Fe_4 / (\%Fe)^2$, кг шлака/т чугуна на каждый 1% железа в шихте.

Анализ полученного выражения показывает, что величина сокращения количества шлака на каждый 1% Fe (обозначим $\Delta Ш = \partial Ш / \partial \%Fe$) по мере увеличения содержания железа в шихте закономерно уменьшается и в случае $Fe_4 = 94\%$ составляет: при $\%Fe = 50\% - 37,6$ кг/т; при $\%Fe = 55\% - 31,0$ кг/т; при $\%Fe = 60\% - 26,1$ кг/т.

Поскольку величина сокращения количества шлака является основной балансовой составляющей экономии кокса, характер зависимости экономии кокса на каждый 1% увеличения содержания железа должен отображать характер сокращения количества шлака. Общая величина экономии зависит также от изменения восстановительной и тепловой работы газов.

В таблицах 1 и 2 приводятся результаты расчетов по модели для ДП-9 ОАО «АМКР» и ДП-5 ОАО «Северсталь» соответственно. По этим данным вычислены обобщенные величины изменений, отнесенные к 1% изменения среднего содержания железа Fe_{Σ} в разных диапазонах: $\Delta Ш$ – количества шлака, кг/т; $\Delta И$ – сырого известняка, кг/т; Δg_d – степени прямого восстановления, %; Δk_{Σ} , Δk – расхода кокса включая и не включая влияние сырого флюса соответственно, %; $\Delta П$ – производительности, %. Указанные изменения величин составляют:

для ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»:

Fe_{Σ} , %	$\Delta Ш$	$\Delta И$	Δg_d	Δk_{Σ}	Δk	$\Delta П$
50 ÷ 55	- 36,5	- 8,2	- 0,1	- 1,62	- 1,2	+ 2,0
56 ÷ 61	- 28,1	- 6,4	- 0,01	- 1,52	- 1,05	+ 1,8

для ДП-5 ОАО «Северсталь»:

Fe_{Σ} , %	$\Delta Ш$	$\Delta И$	Δg_d	Δk_{Σ}	Δk	$\Delta П$
55 ÷ 59	- 28,8	0	+ 0,1	- 1,15	- 1,15	+ 1,6
61 ÷ 65	- 23,1	0	- 0,04	- 0,95	- 0,95	+ 1,3

Характерна близость значений Δk к ранее установленным нормативным величинам [3] при закономерном изменении Δg_d , отличным от ранее наблюдавшегося.

На ДП-9 ОАО «АМКР» g_d уменьшается, на ДП-5 ОАО «Северсталь» – увеличивается с увеличением содержания железа. Первопричиной уменьшения g_d является ускорение косвенного восстановления за счет роста объемной концентрации оксидов в столбе при увеличении содержания железа, которое, однако, тормозится по мере сокращения расхода кокса и соответственно количества и концентрации восстановительного газа (СО). По этой причине ускорение косвенного восстановления и уменьшение g_d превалирует при более высоком расходе кокса (ДП-9 ОАО «АМКР»), а его замедление – при меньшем расходе кокса на ДП-5 ОАО «Северсталь».

Наблюдается тенденция к сокращению удельных потерь теплоты по мере возрастания содержания Fe в шихте при РРН_{2,9} и не вполне определенная при РНфакт. Отмеченные закономерности характерны для обоих рассмотренных вариантов распределения рудных нагрузок – фактического (РНфакт) и равномерного в РКЗ-2-9 (РРН_{2,9}). Различие средних показателей обусловлено улучшением восстановительной и тепловой работы газов при переходе к равномерному в РКЗ-2-9 распределению (РРН_{2,9}).

На рис.2, 3 приводятся графические результаты расчета некоторых параметров процессов плавки.

Варианты прогноза уменьшения содержания Fe в шихте до 54,6% и увеличения до 64,8% против 59,7% в базовом периоде для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» и, 49,6% и 60,8% против 55,2% для условий ДП-9 ОАО «АМКР», при фактических распределениях рудных нагрузок по сечению колошника не приводят к существенному изменению распределения температур газов в печи (рис.2). Это обусловлено тем, что по мере увеличения содержания железа в шихте происходит одновременное сокращение масс шихты и газа в соотношении, при котором отношение теплоемкостей потоков шихты и газа изменяется мало (табл.1, 2). Равномерное распределение рудной нагрузки в РКЗ-2-9 при разных содержаниях железа в шихте во всех случаях приводит к увеличению твердофазной зоны, что способствует уменьшению температуры колошниковога газа и расхода кокса.

Для условий ДП-9 ОАО «АМКР» при фактических параметрах загрузки напряженной и лимитирующей зоной является РКЗ-6. В ней происходит вырождение верхней ступени теплообмена. При уменьшении содержания железа до 49,6% увеличение выхода восстановительных газов с 1643 м³/т до 1793 м³/т, в связи с увеличением расхода кокса, при фактических параметрах загрузки не приводит к устранению локальных зон с минимальной разностью температур шихты и газов. Вариант увеличения содержания железа в шихте до 60,9% не приводит к увеличению количества зон с минимальной разностью температур, лимитирующей зоной остается РКЗ-6.

Для устранения лимитирующих процессов в РКЗ-6 переход к равномерному распределению материалов на колошнике в РКЗ-2-9, в вариантах уменьшения содержания Fe до 49,6%, позволяет улучшить процессы теплопередачи. Разность температур между шихтой и газом в РКЗ-6 становится выше нуля. В целом для печи на ~1,4% от базового значения снижается степень прямого восстановления, в результате улучшения использования газового потока происходит уменьшение температуры колошниковога газа и снижение теплотерь (табл.1). Устранение лимитирующих процессов в РКЗ-6 путем равномерного распределения материалов на колошнике в РКЗ-2-9, в вариантах увеличения содержания железа до 60,9%, не приводит к желаемому результату.

Таблица 1. Основные показатели доменной плавки ДП-9 ОАО «АМКР» при изменении содержания железа в шихте и разном распределении рудной нагрузки на колошнике: фактическом (РНфакт) и равномерном в РКЗ-2-9 (РРН2-9)

(во всех вариантах: Тдутья - 1042⁰С, O₂ - 29,7%, природный газ 81 м³/т)

Показатели	БАЗА	РНфакт				РРН _{2,9}			
Fe в А+О+Р, %	56,06	51,06	55,06	57,06	61,06	51,06	55,06	57,06	61,06
Fe всей шихты, %	55,2	49,6	54,0	56,3	60,8	49,7	54,1	56,3	60,9
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,705	1,544	1,678	1,737	1,882	1,619	1,751	1,893	2,036
Расход твердого топлива, кг/т	513	560	520	504	469	534	497	466	437
Температура кол. газа, ⁰ С	242	247	242	242	243	205	210	156	158
содержание, % CO	28,42	30,13	28,73	28,11	26,75	29,03	27,69	26,61	25,29
CO ₂	19,55	18,00	19,29	19,85	21,16	19,06	20,30	21,46	22,72
H ₂	6,06	5,89	6,04	6,09	6,22	5,93	6,07	6,20	6,28
Всего А+О+Р	1629	1796	1660	1599	1491	1797	1661	1600	1491
известняк	43	87	51	36	7	85	49	32	4
Кол-во шлака, кг/т	410	607	446	375	247	606	445	374	245
Теор. темп-ра горения, ⁰ С	2236	2270	2241	2229	2197	2253	2224	2195	2164
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1721	1892	1747	1690	1562	1805	1672	1559	1451
Прямое восст-е оксида Fe, %	30,99	31,57	31,17	30,99	30,93	29,58	29,51	29,72	29,67
Общий приход тепла, кДж/кг	4848	5375	4924	4749	4350	5114	4700	4335	4005
Потребность теп-ла, кДж/кг	3707	4178	3795	3628	3325	4121	3747	3580	3282
Теплосодержание кол. газа	735	815	743	723	678	649	622	430	409
Остаточное тепло (потери)	407	382	385	398	346	345	331	324	314
Отношение вод-яных чисел	0,82	0,840	0,829	0,822	0,815	0,859	0,847	0,855	0,843
Теплотвор. кол. газа, кДж/м ³	4251	4449	4288	4216	4058	4314	4159	4037	3879

Недостаток восстановительных газов при существующем качестве сырья приводит к перераспределению газов и вырождению верхней ступени теплообмена в РКЗ-3, 8, 9.

Таблица 2. Основные показатели доменной плавки ДП-5 ОАО «Северсталь» при изменении содержания железа в шихте и разном распределении рудной нагрузки на колошнике: фактическом (РНфакт) и равномерном в РКЗ-2-9 (РPH_{2,9})

(во всех вариантах: Гдутья - 1184⁰С, O₂ - 24,3%, природный газ 106 м³/т)

Показатели	БАЗА	РНфакт				РPH _{2,9}			
Fe в А+О+Р, %	59,84	54,84	58,84	60,84	64,84	54,84	58,84	60,84	64,84
Fe всей шихты, %	59,7	54,6	58,6	60,7	64,7	54,6	58,7	60,7	64,8
Удельн. произв-ть, т/м ³ сут	1,765	1,633	1,738	1,778	1,869	1,720	1,813	1,853	1,962
Расход твердого топлива, кг/т	421	448	427	419	403	430	412	403	386
Температура кол.газа, °С	252	264	252	253	253	190	193	203	190
Содержание в кол. газе, % CO	21,39	22,16	21,55	21,31	20,69	21,65	21,09	20,64	20,00
CO ₂	19,73	18,77	19,52	19,81	20,52	19,41	20,09	20,53	21,31
H ₂	6,94	6,79	6,91	6,95	7,01	6,90	6,98	6,97	7,05
Всего А+О+Р, кг/т	1585	1735	1612	1558	1458	1735	1613	1558	1458
Количество шлака, кг/т	270	413	296	244	150	411	295	243	149
Теор. темп-ра горения, °С	1998	2032	2005	1996	1974	2009	1986	1976	1950
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1700	1819	1724	1691	1619	1737	1660	1625	1547
Прямое восст-е оксида Fe, %	26,62	26,14	26,52	26,60	26,43	26,41	26,57	25,97	26,07
Общий приход тепла, кДж/кг	4433	4819	4511	4406	4181	4557	4310	4208	3961
Потребность тепла, кДж/кг	3200	3476	3251	3149	2956	3473	3246	3126	2940
Теплосодержание кол. газа	744	824	753	744	716	566	554	572	515
Остаточное тепло (потери)	489	518	507	513	509	518	510	510	506
Отношение водных чисел	0,78	0,80	0,79	0,78	0,76	0,81	0,80	0,79	0,77
Теплотвор. кол. газа, кДж/м ³	3457	3537	3474	3448	3375	3485	3423	3365	3292

Для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» наиболее нагруженной является РКЗ-9,10. В результате высокой рудной нагрузки в РКЗ-9,10 образуются зоны, разность температур между газом и шихтой в которых близка 1°С. Причем для вариантов с увеличением содержания железа в шихте количе-

ство зон с минимальной разностью температур увеличивается. Устранение этих зон путем перераспределения рудной нагрузки в РКЗ-2-9 ближе к равномерному, также увеличивает их количество. Количество образующегося восстановительного газа при фактических параметрах плавки и шихтовых условиях мало (табл. 2), в результате чего происходит вырождение двухступенчатой схемы теплообмена. Переход к равномерному распределению материалов в РКЗ-2-9 на колошнике лишь усиливает данный эффект вследствие дополнительного снижения расхода кокса.

Сокращение расхода кокса при переходе к равномерному распределению материалов на колошнике происходит за счет улучшения использования тепла газов, а при изменении содержания железа в шихте за счет изменения теплопотребности плавки, в основном на процесс образования и перегрева шлака. Для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» по расходу кокса вариант с содержанием железа в шихте 64,7% при фактическом распределении материалов равноценен варианту с 60,7% при равномерном распределении материалов в РКЗ-2-9. Улучшение степени использования газа (снижение температуры колошникового газа с 253⁰С до 203⁰С) и в результате снижение расхода кокса для варианта с равномерным распределением материалов в РКЗ-2-9 привело к снижению степени прямого восстановления железа до 25,97% (табл.2).

Трансформация зоны размягчения и плавления (ЗРП) при увеличении содержания железа в шихте на обеих печах (рис. 3) характерна некоторым смещением ЗРП вниз с увеличением твердофазной зоны и соответствующим улучшением условий теплообмена и восстановления.

На ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (рис. 3) при изменении содержания железа в шихте толщина и температуры зон размягчения и плавления колеблются в узких пределах. Переход к равномерному распределению шихты в РКЗ-2-9 для всех вариантов приводит к увеличению твердофазной области, благоприятно сказывающемуся на процессах восстановления в печи. При этом в вариантах увеличения содержания железа в шихте равномерное распределение материалов в РКЗ-2-9 приводит к уменьшению толщины ЗРП в периферийных зонах (РКЗ-9-10) на 0,5–1 метр и ее смещению (РКЗ-2-10) из области низа шахты в область распара и заплечиков.

На ДП-5 ОАО «Северсталь» толщина ЗРП меньше, чем на ДП-9 ОАО «АМКР» (рис.3) вследствие меньшего количества поступающих щелочей, а положение в столбе шихты – на более высоком горизонте, вследствие меньшей начальной температуры газа у фурм (меньше содержание кислорода в дутье). Особенностью ЗРП на этой печи является то, что по мере увеличения содержания железа в шихте до 64,8% происходит увеличение толщины зоны размягчения материалов и уменьшение толщины зоны плавления при сохранении общей толщины ЗРП.

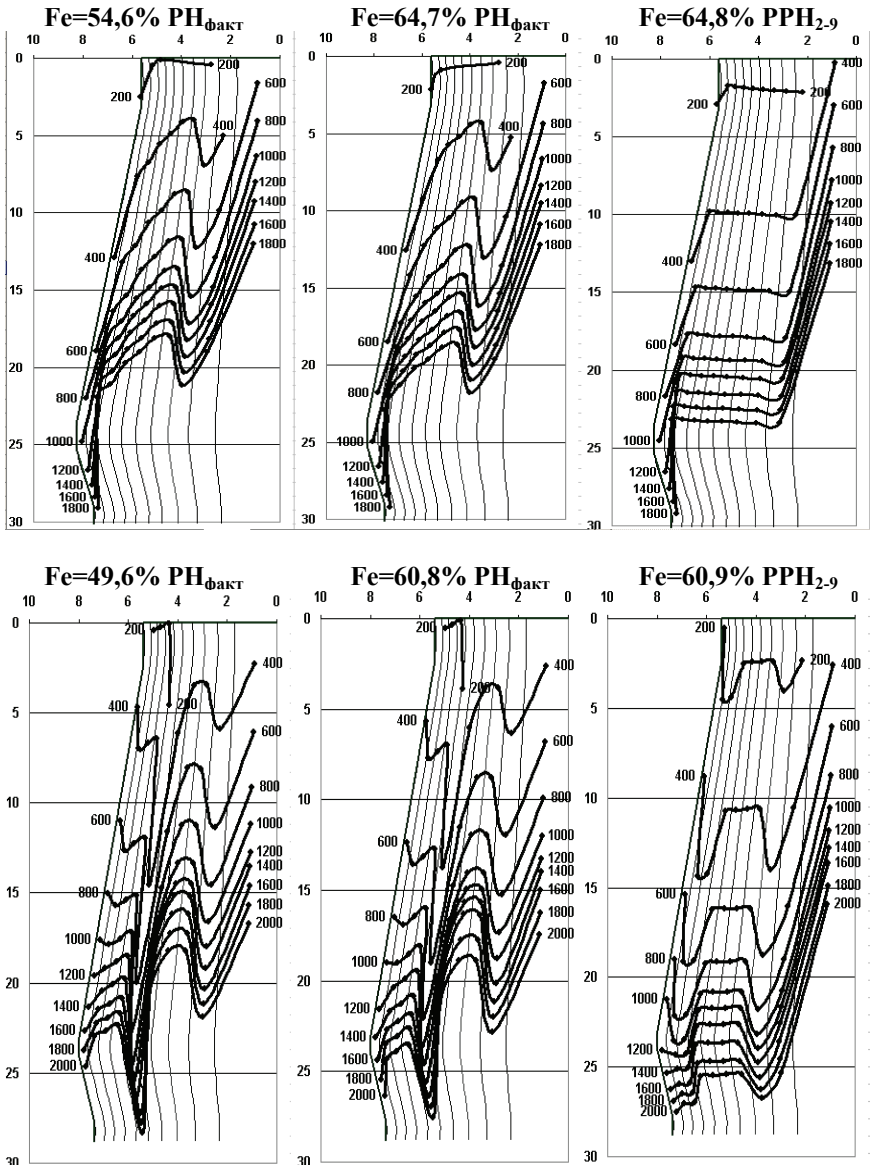


Рис.2. Изотермы газа (цифры у кривых – температуры $^{\circ}\text{C}$) в объеме ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (нижний) при разных содержаниях железа в шихте (Fe_2) и распределении рудной нагрузки (РН_{факт} и РН₂₋₉). По горизонтали - расстояние от оси печи, по вертикали - расстояние от верха, м.

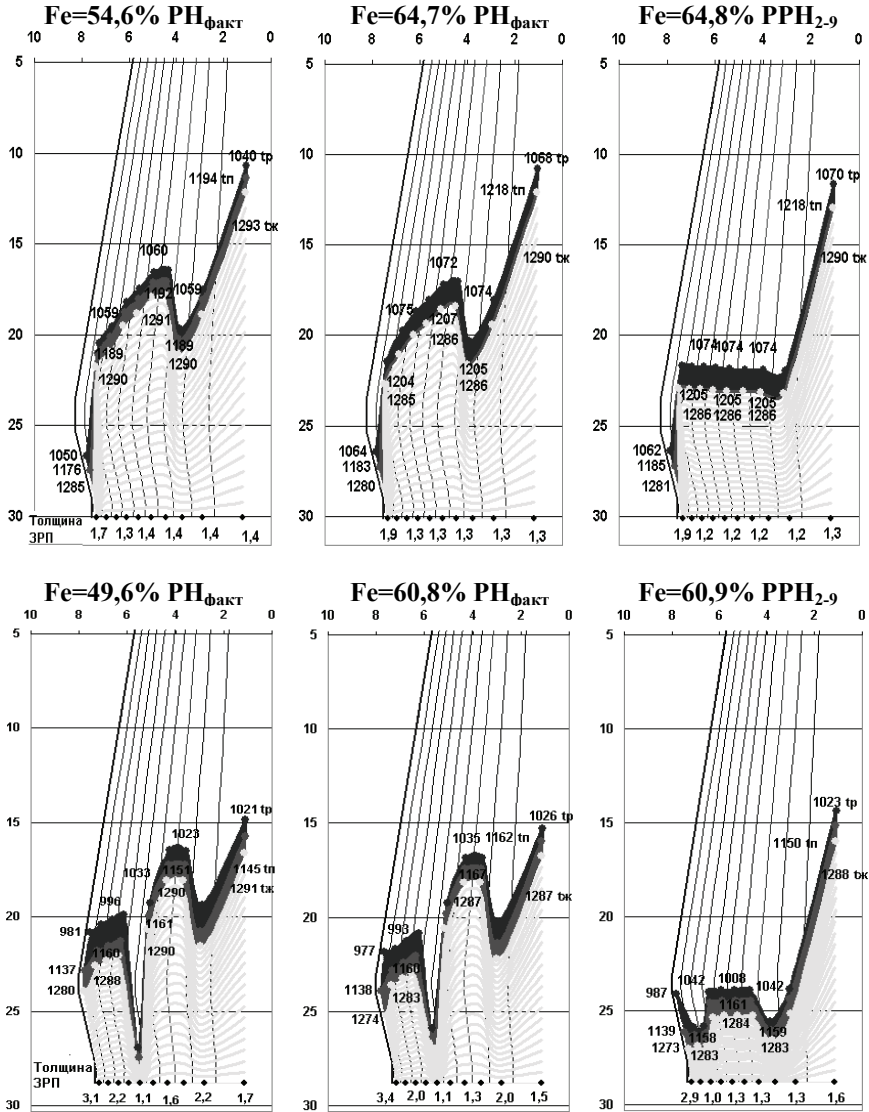


Рис.3. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при фактическом и равномерном распределении материалов на колошнике и различном содержании железа в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АМКР» (нижний). Числа t_p , t_n , $t_{ж}$ – температуры начала размягчения, плавления и оживания, $^{\circ}\text{C}$. По горизонтали - расстояние от оси печи, по вертикали - расстояние от верха, м.

Влияние количества сырого известняка в шихте разной офлюсованности.

Степень офлюсования пустой породы шихты обычно характеризуют величиной расхода сырого известняка и оценивают влияние на показатели плавки вывода его из шихты при увеличении степени офлюсования.

Используемая методика расчетов предусматривает пересчет состава одного из агломератов по условиям получения заданного расхода известняка. С этой целью после определения расхода известняка при заданных расходах кокса и дутьевых добавок, определяют его отклонение от заданного (ДИ), после этого новый состав агломерата считают как средневзвешенный для суммы расхода агломерата и ДИ.

В табл.3 приводятся результаты расчетов показателей плавки по модели для ДП-5 ОАО «Северсталь» и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» По этим данным определено, что при выводе из шихты каждые 10 кг/т чугуна сырого известняка за счет увеличения степени офлюсования агломератов и окатышей экономия кокса и прирост производительности составляют 0,5–0,6%. При колебаниях температуры колошникового газа $\pm 1 \div 2^{\circ}\text{C}$ и степени прямого восстановления $\pm 0,1 \div 0,2\%$ их влияние на расход кокса незначительно, так что эффект определяется сокращением затрат теплоты на разложение карбонатов и взаимодействием выделенного диоксида углерода с твердым углеродом кокса (степень взаимодействия принята 50%).

На рис.4, 5 приведены результаты расчетов параметров процессов плавки для двух рассматриваемых печей при наличии в составе шихт сырого известняка. Изменение температурного поля при увеличении содержания сырого известняка в шихте происходит на обеих печах в направлении снижения температур в шахте и уменьшения разности температур между газом и шихтой (рис. 4). Анализ численных значений показал, что на ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» средняя для 10 РКЗ величина разности температур между газом и шихтой уменьшилась при увеличении расхода сырого известняка от 0 до 200 кг/т в ВТЗ 1-6 со 120 до 70 градусов, а в ВТЗ 7-9 – с 477 до 450 градусов. Соответствующие величины на ДП-5 ОАО «Северсталь» составили 95–61 градус и 370–360 градусов. На этой печи в большинстве РКЗ в области 700–900⁰С наблюдается уменьшение разности температур газа и шихты до близких к нулю значений.

Вариант равномерного распределения рудных нагрузок (РРН2–9) приводит на обеих печах к лучшему использованию теплоты газового потока, следствием которого является снижение температуры колошникового газа (табл. 3), а также к увеличению равномерности распределения температур в поперечном сечении доменной печи, следствием которого является увеличение количества РКЗ в области 700–900⁰С с разностью температур между шихтой и газом близкой нулю.

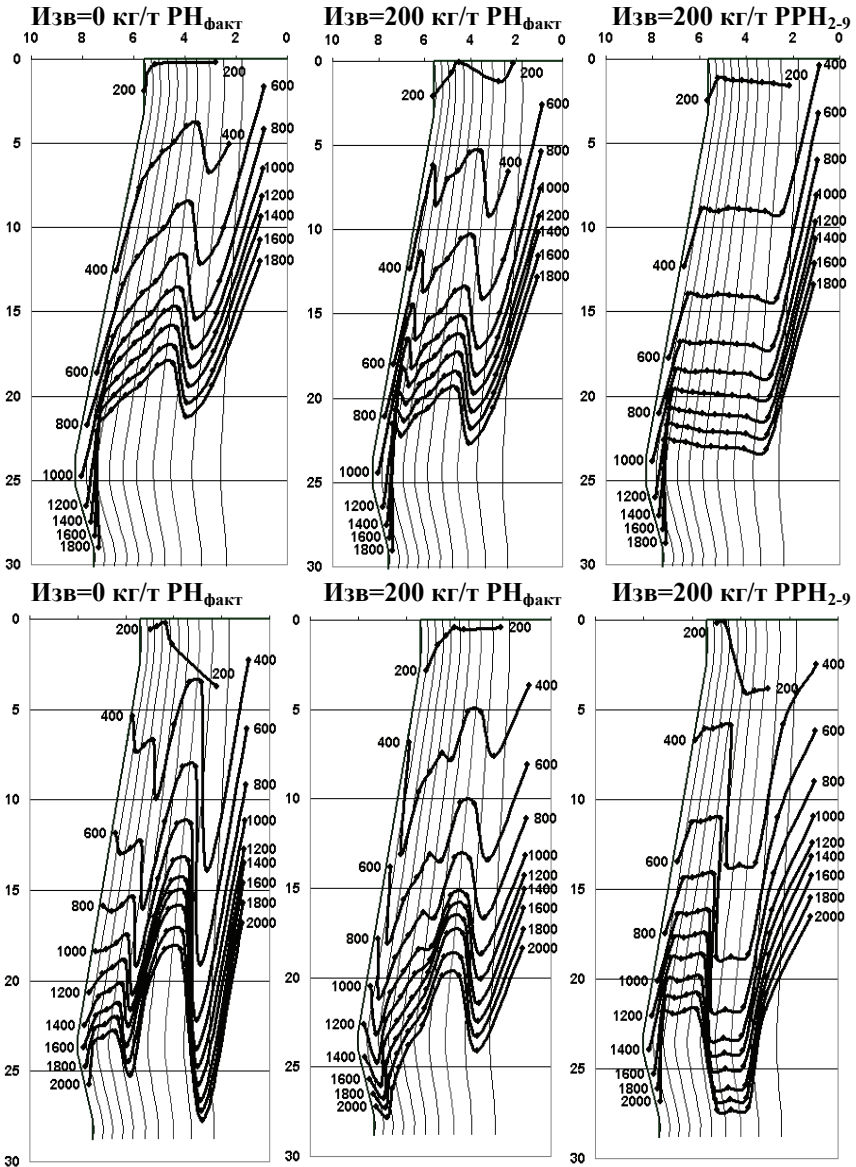


Рис.4. Распределение температур в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (нижний)

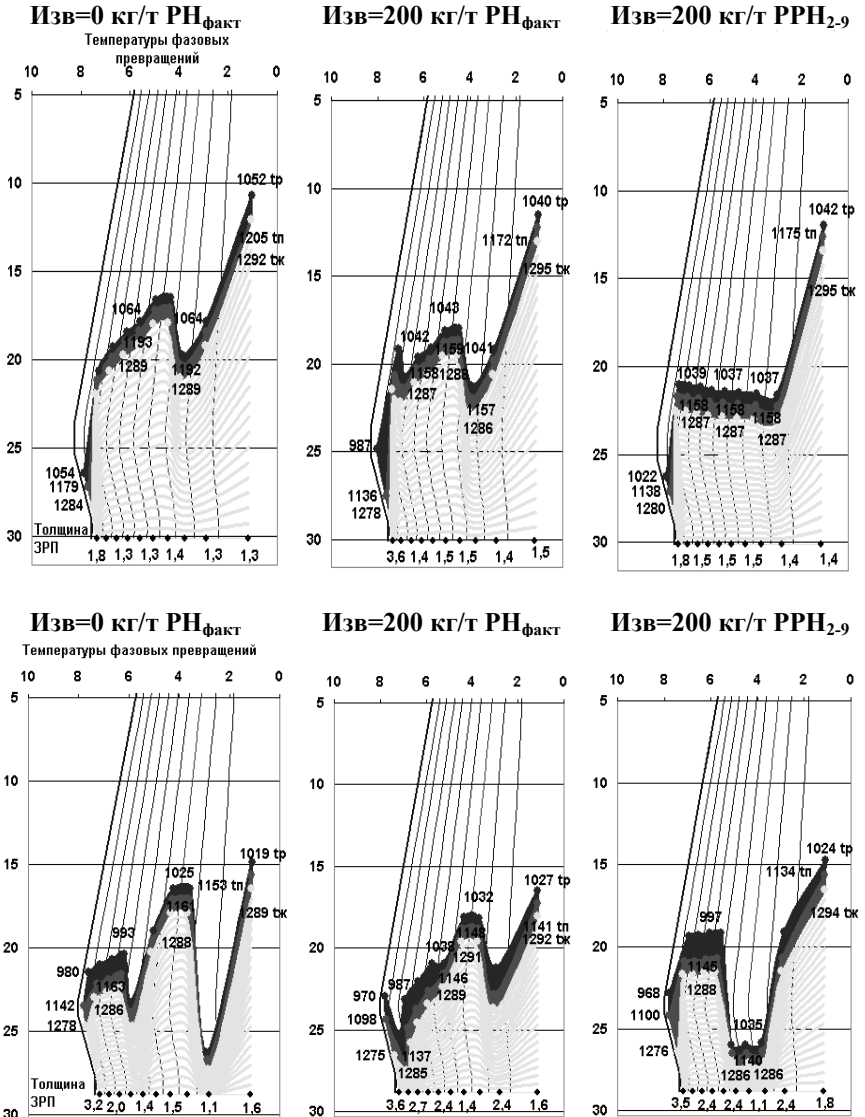


Рис.5. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АМКР» (нижний). Числа t_p , t_n , $t_ж$ – температуры начала размягчения, плавления и ожигения, °С. По горизонтали - расстояние от оси печи, по вертикали - расстояние от верха печи, м

Таблица 3. Показатели доменной плавки при изменении содержания сырого известняка в шихте и при переходе к равномерному распределению РНотн по РКЗ (температура дутья, кислород, природный газ во всех вариантах – как в табл. 1 и 2)

ПОКАЗАТЕЛИ	ДП-5 ОАО «Северсталь»				ДП-9 ОАО «АМКР»			
	РН _{факт}		PPH ₂₋₉		РН _{факт}		PPH ₂₋₉	
Расход известняка, кг/т	0	200	0	200	0	200	0	200
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,756	1,573	1,839	1,610	1,772	1,587	1,836	1,604
Расход куск. топлива, кг/т	422	471	406	461	494	549	476	543
Темп-ра кол. газа, °С	260	251	198	222	237	222	212	212
содержание, % CO	21,31	22,97	20,80	22,66	27,72	29,75	26,80	29,44
CO ₂	19,70	19,67	20,33	20,05	19,91	19,50	20,79	19,78
H ₂	6,91	6,53	6,98	6,57	6,16	5,82	6,17	5,82
Всего А+О+Р	1587	1473	1587	1473	1653	1542	1653	1542
Железо в шихте, %	59,64	59,51	59,68	59,53	55,20	55,03	55,23	55,04
Количество шлака, кг/т	270	272	269	272	409	411	409	411
Теор. темп-ра горения, °С	2001	2045	1980	2035	2222	2256	2208	2253
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1706	1929	1636	1887	1651	1863	1591	1844
Прямое восст-е Fe, %	26,2	24,18	26,27	23,97	31,06	30,38	29,61	29,71
Общ. приход тепла, кДж/кг	4465	4983	4245	4855	4662	5153	4485	5098
Потребность тепла, кДж/кг	3180	3632	3175	3624	3598	4086	3558	4067
Теплосодержание кол. газа	771	844	561	731	691	731	598	692
Остаточное тепло (потери)	514	507	509	501	373	336	330	338
Отношение водяных чисел	0,78	0,77	0,79	0,77	0,83	0,82	0,85	0,82
Теплотв. кол. газа, кДж/м ³	3443	3613	3387	3577	4174	4393	4058	4354

Зона размягчения и плавления (ЗРП) при фактическом распределении рудной нагрузки (РНфакт) в условиях ДП-5 ОАО «Северсталь» при увеличении расхода известняка до 200 кг/т (рис. 5) изменилась существенно: толщина на периферии увеличилась в 2 раза до 3,6 м, температуры начала

размягчения и плавления уменьшились по сравнению с базовым вариантом на 25–40⁰С.

На ДП–9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с увеличением расхода известняка произошло смещение ЗРП в область распара на периферии и небольшое смещение вниз в оси (рис. 5). При этом толщина ЗРП увеличилась на 0,4–1,2 м, а температуры начала размягчения и плавления уменьшилась на 15–25⁰С.

Переход к равномерному распределению материалов на колошнике (РРН2–9) с увеличением расхода известняка в шихте на обеих печах приводит к дополнительному смещению вниз и выравниванию ЗРП в РКЗ-2-9, что способствует увеличению твердофазной области и экономии топлива.

Результирующее влияние указных процессов на конечный расход топлива незначительно, так что экономия от вывода сырого известняка за счет офлюсования агломерата и окатышей определяется, главным образом, основным балансовым фактором – экономией теплоты диссоциации карбонатов Са и Mg и взаимодействия части CO₂, выделяющейся из СаСО₃, с углеродом кокса. При выводе из шихты каждых 10 кг/т чугуна сырого известняка экономия кокса составляет 0,5÷0,6%. Изложенные закономерности необходимо использовать при системном формировании рациональных режимов плавки.

Влияние степени предварительной металлизации шихты

Используемая методика расчетов предусматривает задание содержания железа в компонентах шихты в виде железа общего Fe_Σ, включающего металлическое Fe_м, двухвалентное Fe_{FeO} и трехвалентное Fe_{Fe₂O₃}. Соответственно во всей шихте в целом. Расчеты выполняли при изменении Fe_м во всех компонентах шихты на одну и ту же величину с корректировкой Fe_Σ на величину, соответствующую количеству отнятого кислорода при образовании Fe_м вне доменной печи.

Одновременно определяли степень предварительной металлизации Fe_м/Fe_Σ – показатель (%), принятый для сравнения с другими данными.

В таблицах 4 и 5 приводятся результаты расчетов по модели для ДП–9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» и ДП–5 ОАО «Северсталь» соответственно. По этим данным вычислены обобщенные величины изменений, отнесенные к 1% степени предварительной металлизации железа Fe_м/Fe_Σ (%) в разных диапазонах его изменения: Δt_к – температуры колошникового газа, ⁰С; ΔГ_д – степени прямого восстановления, %; ΔГ_Σ – расхода кокса, %; ΔП – производительности, %.

Основным фактором экономии кокса является сокращение теплопотребления на прямое восстановление железа при замене части окисленной шихты предварительно металлизированной. Значения ΔГ_Σ и ΔП при степени предварительной металлизации до 20% близки к известным экспериментальным и расчетным балансовым значениям [1, 2] и зависят от исходной

степени прямого восстановления [3]. При возрастании степени предварительной металлизации до 30% экономия кокса уменьшается вдвое.

Таблица 4. Основные показатели доменной плавки для условий ДП-9 ОАО «АМКР» и разным распределении рудной нагрузки на колошнике: фактическом (РНфакт) и равномерном в РКЗ-2-9 (PPH_{2,9}). Параметры дутья: T=1042⁰C, ПГ=80,8 м³/т, O₂=29,74%.

ПОКАЗАТЕЛИ	БАЗА	ПГ=0*						РНфакт			PPH _{2,9}		
		33,1	8,9	17,3	33,1	47,8	78,2	17,3	33,1	47,8			
100·Fe _м /Fe _Σ %, %	0	33,1	8,9	17,3	33,1	47,8	78,2	17,3	33,1	47,8			
Содерж. Fe мет, %	0	20	5	10	20	30	55	10	20	30			
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,71	1,82	1,77	1,84	1,91	1,91	1,98	1,84	1,89	1,93			
Расход тверд. топлива, кг/т	513	467	491	468	448	445	429	468	451	441			
В.т.ч. антрацит, кг/т	49,7	45,2	47,6	45,4	43,5	43,1	41,6	45,4	43,7	42,8			
Температура кол. газа, ⁰ C	242	216	242	234	248	286	318	242	266	277			
содержание, % CO	28,42	26,88	29,24	29,81	32,27	34,42	39,32	29,75	32,20	34,31			
CO ₂	19,55	13,68	18,28	17,16	13,82	11,04	4,86	17,20	13,83	11,13			
H ₂	6,06	0,59	6,5	6,93	7,81	8,41	9,94	6,92	7,76	8,44			
Всего А+О+Р	1629	1491	1595	1560	1491	1433	1275	1560	1491	1433			
известняк	43	40	42	40	38	39	43	40	38	39			
Fe в шихте, %	55,15	60,33	56,38	57,66	60,36	62,74	70,31	57,66	60,36	62,75			
Кол-во шлака, кг/т	410	408	409	408	407	407	411	408	408	407			
Теор. темп-ра горения, ⁰ C	2236	2262	2223	2209	2200	2202	2198	2210	2203	2199			
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1721	1648	1663	1603	1566	1574	1564	1604	1576	1563			
Прямое восст-е оксида Fe, %	30,99	45,35	30,51	28,95	29,39	30,62	46,35	28,65	28,65	30,33			
Общий приход тепла, кДж/кг	4848	4576	4672	4503	4385	4409	4345	4509	4427	4375			
Потребность тепла, кДж/кг	3707	3645	3617	3511	3390	3318	3187	3505	3379	3313			
Теплосодержание кол. газа	735	567	704	651	660	752	791	673	713	722			
Остаточное тепло (потери)	407	364	352	341	335	338	366	331	335	339			
Отношение водяных чисел	0,82	0,83	0,83	0,84	0,83	0,81	0,79	0,84	0,83	0,82			
Теплотвор. кол. газа, кДж/м ³	4251	3464	4403	4521	4928	5264	6050	4512	4914	5254			

* ПГ=0 м³/т, O₂=21%

Таблица 5. Основные показатели доменной плавки для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» при различной степени металлизации шихты и разном распределении рудной нагрузки на колошнике: фактическом (РНфакт) и равномерном в РКЗ-2-9 (РРН₂₋₉) и РКЗ-2-10 (РРН₂₋₁₀). Параметры дутья: T=1184⁰C, ПГ=106 м³/т, O₂=24,3%

ПОКАЗАТЕЛИ	БАЗА	РНфакт			РРН ₂₋₉			РРН ₂₋₁₀		
100·Fe _м /Fe _з %, %	0	16,0	30,6	43,8	16,0	30,6	43,8	16,0	30,6	43,8
Содерж. Fe мет., %	0	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,765	1,78	1,793	1,815	1,78	1,79	1,791	1,85	1,861	1,873
Расход тверд. топлива, кг/т	421	404	395	389	402	395	394	389	380	377
Температура кол. газа, ⁰ C	252	317	364	396	316	364	411	270	322	360
содержание, %										
CO	21,39	22,85	25,03	27,20	22,77	24,99	27,31	22,27	24,39	26,82
CO ₂	19,73	16,97	13,89	11,01	17,04	13,92	10,90	17,54	14,43	11,32
H ₂	6,94	7,73	8,64	9,54	7,73	8,64	9,47	7,81	8,75	9,70
Всего А+О+Р	1585	1517	1449	1381	1517	1449	1381	1517	1449	1381
Fe в шихте, %	59,65	62,36	65,30	68,52	62,36	65,30	68,52	62,40	65,35	68,56
Количество шлака, кг/т	270	268	267	267	268	267	267	267	267	266
Теор. темп-ра горения, ⁰ C	1998	1998	1999	1998	1997	1999	2005	1980	1981	1983
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1700	1682	1686	1690	1677	1684	1711	1620	1623	1640
Прямое восст-е оксида Fe, %	26,62	22,95	22,18	22,88	22,71	22,04	22,90	22,31	20,88	22,14
Общий приход тепла, кДж/кг	4433	4426	4435	4427	4414	4430	4495	4240	4252	4272
Потребность тепла, кДж/кг	3200	3009	2908	2843	3003	2905	2844	2989	2879	2827
Теплосодержание кол. газа	744	914	1028	1093	908	1026	1151	751	878	964
Остаточное тепло (потери)	489	503	499	491	503	499	500	500	495	481
Отношение водяных чисел	0,78	0,77	0,76	0,74	0,77	0,76	0,74	0,78	0,77	0,75
Теплотвор. кол. газа, кДж/м ³	3457	3728	4101	4474	3716	4096	4480	3662	4032	4442

Указанные изменения величин составляют:
для ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

$Fe_{\Sigma}, \%$	55,2	56,4	57,7	60,4	62,7	70,3
$Fe_M, \%$	0	5	10	20	30	55
$100 \cdot Fe_M / Fe_{\Sigma}$	0	8,9	17,3	33,1	47,8	78,2
$\Delta t_k, ^\circ C$		0	0	+ 0,4	+ 3,5	+ 1,0
$\Delta r_d, \%$		- 0,05	- 0,2	0	+0,08	+ 0,53
$\Delta \kappa_{\Sigma}, \%$		- 0,48	- 0,55	- 0,27		- 0,14
$\Delta \Pi, \%$		+ 0,43	+ 0,43	+ 0,22		+ 0,13

для ДП-5 ОАО «Северсталь»

$Fe_{\Sigma}, \%$	59,7	62,4	65,3	68,5
$Fe_M, \%$	0	10	20	30
$100 \cdot Fe_M / Fe_{\Sigma}$	0	16,0	30,6	43,8
$\Delta t_k, ^\circ C$		+ 4,0	+ 3,2	+ 2,4
$\Delta r_d, \%$		- 0,23	- 0,05	+ 0,05
$\Delta \kappa_{\Sigma}, \%$		- 0,25	- 0,15	- 0,11
$\Delta \Pi, \%$		+ 0,05	+ 0,05	+ 0,09

Температура колошникового газа по мере увеличения степени предварительной металлизации возрастает на обеих печах (в большей мере на ДП-5 ОАО «Северсталь»), что обусловлено изменением интенсивности теплообмена по высоте (см. ниже) и ограничивает эффективность технологии.

Степень прямого восстановления r_d по мере роста степени предварительной металлизации до 30% сокращается на обеих печах, что связано с увеличением доли восстановителей в газе за счет сокращения количества поступающего кислорода оксидов железа. При более высоких степенях предварительной металлизации роль этого фактора ослабляется и возрастает тормозящая роль на косвенное восстановление сокращения объемной доли оксидов железа в шихте. В результате этого происходит некоторое возрастание r_d .

Отмеченные закономерности характерны для всех рассмотренных вариантов распределения рудных нагрузок – фактического ($PH_{\text{факт}}$), равномерного в РКЗ-2-9 ($PH_{2,9}$) и равномерного в РКЗ-2-10 ($PH_{2,10}$).

При этом в условиях применения предварительно металлизированной шихты наблюдается необычное влияние распределения рудных нагрузок на показатели плавки: при переходе от фактического ($PH_{\text{факт}}$) к равномерному распределению в РКЗ-2-9 ($PH_{2,9}$) существенного изменения показателей плавки не происходит на обеих печах. Не происходит изменения и при переходе к равномерному распределению в РКЗ-2-10 ($PH_{2,10}$) на ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог». Лишь на ДП-5 ОАО «Северсталь» при переходе к равномерному распределению в РКЗ-2-10 ($PH_{2,10}$) имеет

место обычно наблюдаемое в таких случаях улучшение использования газов и сокращение расхода кокса.

По-видимому, ослабление влияния распределения материалов на колошнике на показатели плавки является специфической особенностью технологии доменной плавки с применением предварительно металлизированного сырья. Что касается варианта PPH_{2-10} на ДП-5 ОАО «Северсталь», то он относится к исключению, т.к. при $RH_{\text{факт}}$ содержит лимитирующую область в РКЗ-10 (периферия) с предельной рудной нагрузкой, значительно превышающей RH в остальных РКЗ. Наличие этой области не позволяет реализовать резервы экономии топлива в других микрообъемах столба шихты, что отмечалось нами ранее [3]. При переходе к равномерному распределению RH в РКЗ-2-10 (PPH_{2-10}) уменьшается RH у периферии и ослабляется указанное ограничение улучшения показателей, что способствует экономии кокса.

На рис.6, 7 приводятся результаты расчета процессов доменной плавки в объеме столба шихты для указанных двух доменных печей.

Важнейшей характеристикой классической доменной плавки является двухступенчатая схема теплообмена по высоте, обусловленная наличием в средней части столба зоны сильного внутреннего теплопотребления, которая отделяет верхнюю зону интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_v = (W_{\text{ш}}/W_{\text{г}}) < 1$ от нижней зоны интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_n = (W_{\text{ш}}/W_{\text{г}}) > 1$. Основным фактором внутреннего теплопотребления шихты является развитие прямого восстановления железа. Чем оно больше, тем интенсивнее теплообмен в нижней зоне. Однако по мере увеличения степени предварительной металлизации шихты объем развития прямого восстановления сокращается, и интенсивность теплообмена уменьшается. Происходит постепенная трансформация присущей доменной плавке схемы теплообмена в направлении схемы, присущей вагранке [4, с.161].

В табл.6 приводятся результаты расчета отношения теплоемкостей потоков m_v и m_n для разных РКЗ при разной степени предварительной металлизации шихты. В базовом варианте в ВТЗ-7 (900–1000⁰С) m_n достигает 4,34 и 3,957 на ДП-9 и ДП-5 соответственно, а в варианте с металлизацией шихты до 30–55% m_n уменьшается до 1,578 для ДП-9 и 2,319 для ДП-5. Такое сокращение m_n и соответственно интенсивности теплообмена приводит к перемещению высоких температур газа в верхние горизонты столба и повышению температуры колошникового газа, что и наблюдается на рис.6. При этом на обеих печах в большинстве РКЗ увеличивается потребная для нагрева продуктов плавки высота нижней степени теплообмена и соответственно сокращается высота верхней при увеличении минимальной по высоте разности температур шихты и газа. В соответствии с перемещением изотерм происходит и смещение вверх ЗРП (рис.7) и, при заданных свойствах материалов, также увеличение её толщины.

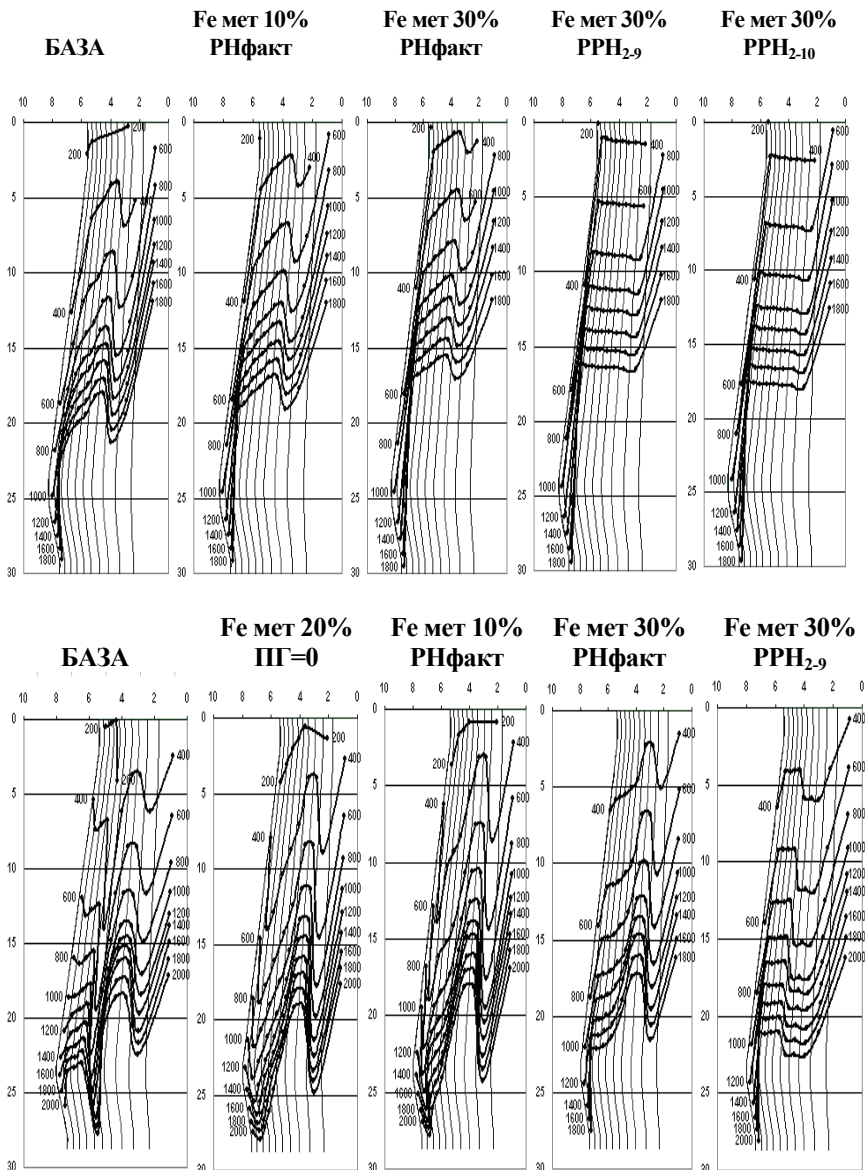


Рис.6. Изотермы газа (цифры у кривых – температуры $^{\circ}\text{C}$) в объеме ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АМКР» (нижний) при различной степени предварительной металлизации шихты и распределении рудной нагрузки ($\text{РН}_{\text{факт}}$, $\text{РРН}_{2,9}$, $\text{РРН}_{2,10}$). По горизонтали - расстояние от оси печи, по вертикали - расстояние от верха, м

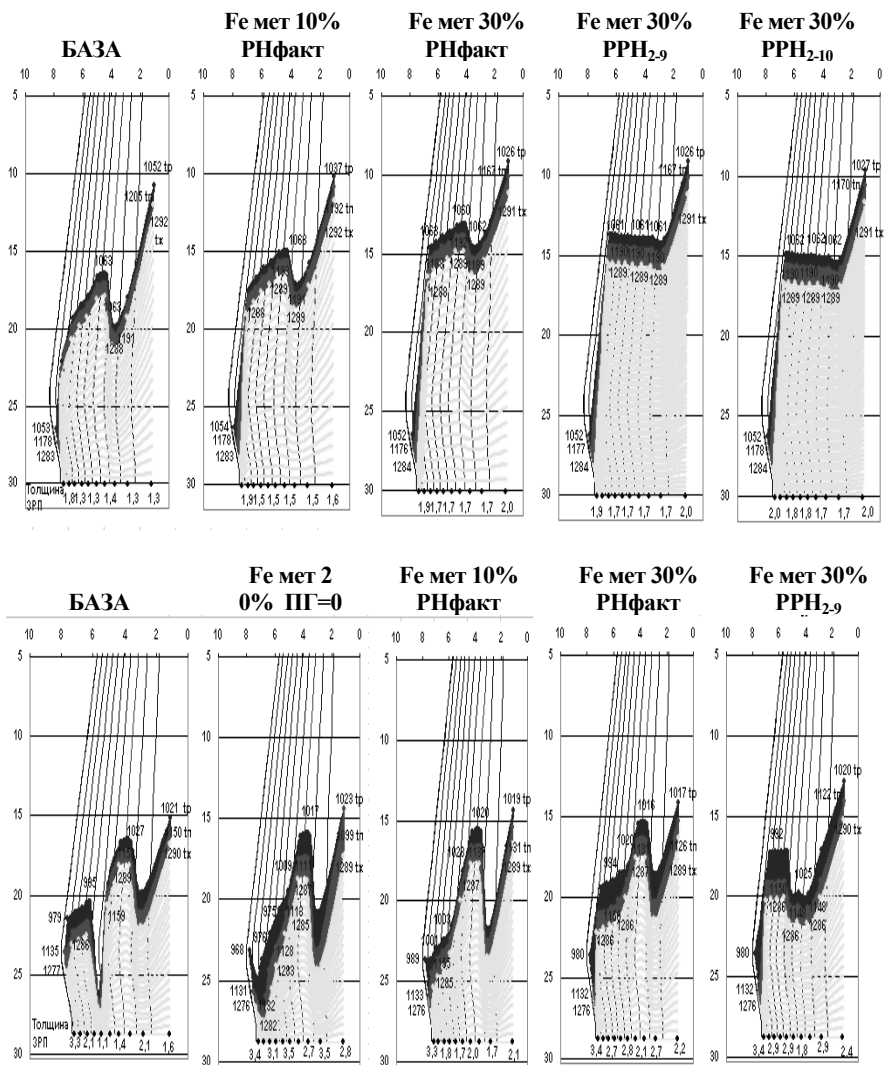


Рис. 7. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме ДП-5 ОАО «Северсталь» (верхний) и ДП-9 ОАО «АМКР» (нижний) при при различной степени предварительной металлизации шихты и при разном распределении рудных нагрузок. Числа tp , tp , tx – температуры начала размягчения, плавления и ожежения, $^{\circ}C$. По горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха, $^{\circ}C$

Таблица 6. Изменение отношения теплоемкостей потоков шихты и газов в верхней (мв) и нижней (мн) зоне доменной печи при различной степени предварительной металлизации шихты (Fe_M / Fe_{Σ}) и фактическом распределении рудной нагрузки на колошнике

		ДП-9 ОАО «АМКР»					ДП-5 ОАО «Сверталь»				
		100- Fe_M/Fe_{Σ} (%)					100- Fe_M/Fe_{Σ} (%)				
		0	17,3	33,1	47,8	78,2	0	16,0	30,6	43,8	
газ-400 ⁰	мв	0,838	0,842	0,828	0,807	0,783	0,693	0,667	0,644	0,631	
400-500 ⁰		0,974	0,971	0,925	0,888	0,856	0,893	0,880	0,838	0,797	
500-600 ⁰		0,879	0,915	0,902	0,901	0,895	0,786	0,733	0,741	0,755	
600-700 ⁰		1,087	1,108	1,071	1,010	0,938	0,989	0,947	0,922	0,892	
700-800 ⁰		0,970	0,971	0,950	0,916	0,898	0,912	0,876	0,884	0,864	
800-900 ⁰		1,055	1,075	1,049	1,018	0,981	1,040	1,009	0,965	0,927	
900-1000 ⁰	мн	4,340	3,699	3,032	2,625	1,578	3,957	3,090	2,628	2,319	
1000-1100 ⁰		0,984	1,145	1,194	1,210	1,416	0,833	0,819	0,823	0,828	
1100-1200 ⁰		1,373	1,522	1,541	1,559	1,848	1,181	1,161	1,142	1,136	
1200-1300 ⁰		1,902	2,082	2,098	2,091	2,336	1,765	1,742	1,725	1,719	
1300-1400 ⁰		1,384	1,482	1,501	1,462	1,485	1,258	1,246	1,238	1,237	
1400-пл		1,132	1,208	1,216	1,161	1,185	0,846	0,828	0,818	0,815	

Таким образом, основной балансовый фактор экономии кокса от использования предварительно металлизированной шихты реализуется достаточно полно при степени металлизации до 20%. По мере увеличения степени металлизации выше 20% процессы тепломассообмена, фазовых превращений и газомеханики развиваются в направлении, ограничивающем эффективность реализации этой технологии.

Анализ технологических факторов и процессов при использовании предварительно металлизированной шихты показывает также, что вдувание природного газа при этом теряет смысл. Приведенные в таблице 4 результаты расчета варианта работы ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» со степенью предварительной металлизации шихты 33,1% ($Fe_M = 20\%$) при использовании и при выводе природного газа и кислорода иллюстрируют это положение (вариант ПГ=0). Экономические и энергетические преимущества второго варианта очевидны при любых реальных ценах на ресурсы.

Заключение

1. Изучение влияния содержания окисленного железа в шихте, степени офлюсования пустой породы и степени предварительной металлизации шихты на показатели доменной плавки с помощью математической модели позволило, наряду с количественным уточнением связей исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность), раскрыть внутренние связи процессов в объеме печи, влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты.

2. Установлено, что наряду с основным балансовым фактором экономии кокса при увеличении содержания окисленного железа в шихте – уменьшением количества шлака существенное влияние на расход кокса оказывают характер тепломассообмена и распределение материалов и газов в печи, связанные прямыми и обратными связями с расходами кокса и железорудных материалов. Показано, в частности:

- закономерное уменьшение экономии кокса при увеличении содержания железа в шихте на каждый последующий процент;

- сокращение степени прямого восстановления при увеличении содержания железа в шихте в области низких абсолютных его значений и большом расходе кокса, а также увеличение этого показателя в противоположной области значений содержания железа в шихте и расхода кокса;

- смещение вниз зоны размягчения и плавления при увеличении содержания железа в шихте с увеличением твердофазной зоны, что способствует улучшению условий теплообмена и восстановления;

- меньшая эффективность повышения содержания железа в шихте при наличии радиальных кольцевых зон с вырожденной верхней ступенью теплообмена, что вызывает необходимость более равномерного распределения рудных нагрузок при возрастании требований к физико-механическим свойствам сырья и кокса.

3. Установлено, что с увеличением количества сырого известняка в шихте происходит уменьшение разности температур газа и шихты, особенно в области температур шихты 700–900⁰С, а также смещение изотерм в нижней части печи. Зона размягчения и плавления также смещается в низ печи с увеличением толщины отдельных её элементов. Результирующее влияние указных процессов на конечный расход топлива незначительно, так что экономия от вывода сырого известняка за счет офлюсования агломерата и окатышей определяется, главным образом, основным балансовым фактором – экономией теплоты диссоциации карбонатов и взаимодействия части CO₂, выделяющейся из CaCO₃, с углеродом кокса.

При выводе из шихты каждых 10 кг/т чугуна сырого известняка экономия кокса составляет 0,5÷0,6%.

4. Установлено, что наряду с основным балансовым фактором экономии кокса при увеличении степени предварительной металлизации шихты – сокращением теплотребления на прямое восстановление железа существенное влияние на расход кокса оказывают характер тепломассообмена, фазовых превращений, газомеханики и распределения материалов и газов в печи, связанные прямыми и обратными связями с расходами кокса и железорудных материалов.

По мере увеличения степени предварительной металлизации шихты сокращается теплотребление на прямое восстановление железа и соответственно уменьшается отношение теплоемкостей шихты и газа, а также интенсивность теплопередачи в нижней зоне. Вследствие этого увеличивается потребная для нагрева продуктов плавки высота нижней ступени

теплообмена и соответственно сокращается высота верхней при увеличении минимальной по высоте разности температур шихты и газа. В результате изотермы газа перемещаются вверх, увеличивая потери через колошник, а зона размягчения и плавления располагается выше базового положения и утолщается.

Под действием указанных факторов основной балансовый фактор экономии кокса от использования предварительно металлизированной шихты не может быть реализован достаточно полно при степени металлизации более 20%, т.к. процессы тепломассообмена, фазовых превращений и газомеханики развиваются в направлении, ограничивающем эффективность реализации этой технологии.

Специфической особенностью технологии доменной плавки с применением предварительно металлизированного сырья является ослабление влияния распределения материалов на колошнике на показатели плавки.

В связи с сокращением объема прямого восстановления вдувание природного газа при использовании металлизированной шихты теряет смысл.

5. Изложенные закономерности необходимо использовать при системном формировании рациональных режимов плавки.

1. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс. – М.: Металлургия, 1980. – 304 с.
2. *Товаровский И.Г.* Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.
3. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768 с.
4. *Чаплыгин Ю.В., Еринов А.Е.* Использование природного газа при плавке чугуна. – К.: Наукова думка, 1976. – 239 с.

Статья рекомендована к печати докт.техн.наук И.Г.Муравьевой

І.Г.Товаровський, В.І.Большаков, О.Е.Меркулов

Аналітичне дослідження процесів і режимів доменної плавки при різних параметрах залізородної шихти

За допомогою розробленої в Інституті багатозонної математичної моделі доменної плавки виконано аналітичне дослідження показників процесу плавки при зміні загального вмісту заліза в шихті, ступені його металізації і ступені офлюсовання порожньої породи з варіюванням розподілу матеріалів по радіусу печі. Для умов доменних печей об'ємом більше 5000 м³ виявлено внутрішні зв'язки процесів в об'ємі доменної печі, що впливають на характер режимів плавки і кінцеві результати. Одержані нові наукові результати можуть бути використані для практичного застосування